中国生态农业学报 2017年10月 第25卷 第10期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2017, 25(10): 1495−1507

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170292

周旋, 吴良欢, 戴锋. 生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田水稻养分累积及利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1495−1507
Zhou X, Wu L H, Dai F. Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on nutrient uptake and use efficiency of rice in yellow clayey field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1495−1507

生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田水稻养分累积及利用率的影响*

周 旋[1,2], 吴良欢[1,2**], 戴 锋[3]

(1. 教育部环境修复与生态健康重点实验室/浙江大学环境与资源学院 杭州 310058; 2. 浙江省农业资源与环境重点实验室/浙江大学环境与资源学院 杭州 310058; 3. 浙江奥复托化工有限公司 上虞 312300)

摘 要: 添加生化抑制剂是提高水稻肥料利用率的有效途径之一, 本研究结合不同施肥模式探讨其节肥增效的养分利用特征, 以期寻找适合黄泥田地区水稻高产高效的施用方式。采用二因素随机区组设计, 研究生化抑制剂[脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)和 N-丙基硫代磷酰三胺(NPPT)及硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)]组合与施肥模式(一次性和分次施肥)互作对黄泥田水稻养分吸收、利用和分配的影响, 并探讨各养分间及其与产量的相互关系。结果表明: 生化抑制剂组合和施肥模式对水稻主要生育期 N、P、K 累积、转运和分配的影响均存在一定的互作效应, 互作条件下各生育期养分间吸收存在协同效应。尿素分次施用处理水稻成熟期 N、P、K 吸收量较一次性施用处理分别提高 11.0%、0.9%、4.2%; 氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率分别显著提高 27.5%、70.8%。不同施肥模式下, 配施抑制剂组合(NBPT、NPPT/+CP)显著增加水稻 N、P、K 吸收量, 促进抽穗后干物质生产和 N 素积累, 提高籽粒中的养分分配及 N 素利用效率。新型脲酶抑制剂 NPPT 单独施用及与 CP 配施的水稻养分吸收和利用与 NBPT 相似。相关分析表明, 不同施肥模式下水稻成熟期 N、P、K 吸收量与籽粒产量均呈极显著正相关。总之, 通过施肥技术和抑制剂配施的集成与优化, 有利于抽穗后 N、P、K 的吸收、转运, 促进养分积累, 大幅度同步提高黄泥田水稻的产量和养分利用效率。

关键词: 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; 施肥模式; 黄泥田; 养分累积; 养分利用率
中图分类号: S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)10-1495-13

Effects of combined biochemical inhibitors and fertilization models on nutrient uptake and use efficiency of rice in yellow clayey field*

ZHOU Xuan[1,2], WU Lianghuan[1,2**], DAI Feng[3]

(1. Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, Ministry of Education / College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment / College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Zhejiang Aofutuo Chemical Limited Company, Shangyu 312300, China)

---

* 苕溪流域农村污染治理技术集成与规模化工程示范(2014ZX07101-012)、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB150502)、浙江省“三农六方”科研协作计划项目和浙江大学-浙江奥复托化工有限公司合作项目资助
** 通讯作者: 吴良欢, 主要从事有机营养与养分综合管理研究。E-mail: finm@zju.edu.cn
周旋, 主要从事肥料与养分资源管理研究。E-mail: zhouxuan_123@126.com
收稿日期: 2017-04-05 接受日期: 2017-05-17

* This paper was supported by the Rural Non-point Pollution Control Technology Integration and Scale Demonstration Project of Tiaoxi Catchment of Zhejiang Province, China (2014ZX07101-012), the National Key Basic Research Program (2015CB150502), “San Nong Liu Fang” Research Plan of Zhejiang Province and the Cooperation Project of Zhejiang University-Zhejiang Aofutuo Chemical Limited Company.
** Corresponding author, E-mail: finm@zju.edu.cn
Received Apr. 5, 2017; accepted May 17, 2017

Abstract: Application of biochemical inhibitors for urease and nitrification is an effective way of improving fertilizer use efficiency of rice. The objective of this study was to determine the characteristics of nutrient use of rice as affected by biochemical inhibitors and fertilization models, and find the optimal yield and efficient application method in rice growing region in yellow clayey soils. It analyzed the interaction effects of biochemical inhibitors [urease inhibitors N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT] and N-(n-propyl) thiophosphoric triamide (NPPT), and nitrification inhibitor 2-chloro-6-(trichloromethyl) pyridine (CP)] with fertilization models (one-off and three-time fertilizations) on nutrient absorption, utilization and distribution of rice, and the relationship between nutrient uptake and grain yield using two factor randomized block design. Results showed that certain interaction effects was observed between inhibitor combination and fertilization model on the uptake, utilization and distribution of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) at the main growth periods of rice. The three times urea fertilization treatment significantly increased N, P and K uptake (respectively by 11.0%, 0.9% and 4.2%) at maturity, and N recovery efficiency and N agronomic efficiency (respectively by 27.5% and 70.8%**)** over those of one-off urea fertilization treatment. The addition of inhibitors (NBPT, NPPT/+CP) significantly increased N, P and K uptakes of rice, dry matter production and N accumulation after heading stage. It also improved the allocation of nutrients in grain and N use efficiency under different fertilization models. The application of new urease inhibitor NPPT alone or combined with CP had the similar effect on nutrient uptake and use in paddy fields with NBPT. The uptake of N, P and K of rice at maturity had significant positive correlation with grain yield under different fertilization models. In conclusion, the integration and optimization of fertilization techniques combined with inhibitors enhanced the uptake and transport of N, P and K after heading stage. It also promoted nutrient accumulation and at the same time significantly improved rice yield and nutrient use efficiency in yellow clayey fields.

Keywords: Urease inhibitor; Nitrification inhibitor; Fertilization model; Yellow clayey field; Nutrient uptake; Nutrient use efficiency

我国是世界上氮肥消耗量最多的国家，占世界氮肥消耗量的 30%左右，其中稻田氮肥用量约占我国氮肥总消费量的 24%，主要是尿素[1]，而氮肥当季利用率仅为 30%~35%[2]，甚至更低[3]。尿素是我国农业生产中应用最广泛的氮肥品种，其含氮(N)量高、价格便宜、使用方便，但利用率低、肥效短[4]。因此，如何有效提高氮肥利用率、保证作物高产并降低环境风险，是农业生产与环境保护迫切需要解决的问题[5]。

脲酶抑制剂与尿素一起施用可以延缓酰胺态氮向铵态氮(NH_4^+-N)的转化 7~14 d，减少 N 素损失，提高氮肥利用率[6-7]。研究表明，在热带淹水稻田等地区，N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)可以有效提高作物产量和氮肥利用率[8]。从氮肥施用后在土壤中的生物化学转化过程入手，通过硝化抑制剂调控 N 素转化，也是实现 N 素高效利用并减缓氮肥污染的有效措施[9-10]。大量研究表明，尿素结合抑制剂研制缓/控释肥料，对其水解及 N 素转化形态、速率进行控制，可以延长肥效期，减少氮肥损失，提高水稻(*Oryza sativa* L.)对氮肥的利用效率[11]。但抑制效果同时受到土壤质地、有机质含量、温度、水分、pH、氮肥种类和耕作制度等影响[12-14]。

黄泥田是广泛分布于南方省份的一种典型渗育型水稻土[15]，通常水分供应不足，磷(P)、钾(K)养分缺乏，属于中低产水稻田[16]。黄泥田施用磷肥易被铁、铝固定，氮肥、钾肥易流失，有效性低[17]，而添加硝化抑制剂氯甲基吡啶(CP)结合尿素能促进早、晚稻生长，增产增收，提高氮肥利用率[18]。孙海军等[19]研究认为，施用 CP 增加水稻秸秆与籽粒中含 N 量，减少 N 素经硝化反硝化、径流等途径损失，从而提高作物 N 素吸收与利用效率。

相关研究指出，氮肥吸收利用效率受施 N 水平、施肥方法、土壤性状、气候条件和品种类型等因素的影响而存在较大差异[20-22]。确定合理的施 N 水平和施肥比例，可以满足水稻不同生育期对 N 素的需求，有效降低 N 素损失，提高利用效率[23-26]。研究表明，适当增加穗粒肥比率，可以提高氮肥的吸收利用率与生产效率[27-28]。目前，缺乏抑制剂配施与施肥模式互作对水稻养分吸收利用、转运和分配特征影响的研究。确立合理的施 N 量后，如何结合不同的抑制剂组合进行适宜的氮肥运筹管理，调控水稻主要生育期 N、P、K 的吸收利用及其与产量间的相关关系，尚不明确。浙江奥复托化工公司经多次筛选发现一款有良好应用前景的脲酶抑制剂—N-丙基硫代磷酰三胺(NPPT)[29]。为此，在前期试验[18,30]的基础上，本文进一步研究抑制剂与施肥模式互作条件下水稻对 N、P、K 吸收利用的特点，并探讨各养分吸收、分配及其与产量间的关系，寻找适合该地区水稻高产高效的施用方式，为黄泥田生化抑制剂直接配施农用提供理论依据和技术途径。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2015 年 5—10 月在浙江省金华市婺城区琅琊镇金朱村(29°01′19″N, 119°27′96″E)进行。该区地处金衢盆地东缘，属于中亚热带季风气候，海拔 86 m，年均降雨量 1 424 mm，年均气温 17.5 ℃。供试土壤为黄泥田水稻土，前茬为冬闲田。耕层土壤基本理化性状为 pH(H_2O)5.31(土∶水=1∶1)，有机质 25.60 $g \cdot kg^{-1}$，全氮 1.87 $g \cdot kg^{-1}$，碱解氮 118.40 $mg \cdot kg^{-1}$，有效磷 7.21 $mg \cdot kg^{-1}$，速效钾 93.00 $mg \cdot kg^{-1}$。

1.2　供试材料

供试水稻品种为杂交籼稻‘两优培九’。供试肥料品种氮肥为尿素(含 N 46%)，磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)，钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%)。脲酶抑制剂 N-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、N-丙基硫代磷酰三胺(NPPT)和硝化抑制剂 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)24%乳油剂型为分析纯，由浙江奥复托化工有限公司生产。

1.3　试验设计

试验采用生化抑制剂组合×施 N 模式两因素随机区组设计，设置 2 种施 N 模式(一次性和分次施肥)和 6 种生化抑制剂组合及不施 N 处理(CK)，共 13 个处理(表 1)。氮肥与抑制剂配施前将两者混合均匀。磷(P_2O_5)、钾(K_2O)用量分别为 90 $kg \cdot hm^{-2}$ 和 120 $kg \cdot hm^{-2}$。磷肥和钾肥全部用作基肥于移栽前一次性施入。栽插密度为 19.8 cm×19.8 cm, 25 万穴$\cdot hm^{-2}$，每穴 2 苗。单季稻于 2015 年 5 月 28 日播种，6 月 21 日移栽，10 月 14 日收获。小区面积 30 m^2(5 m×6 m)，重复 3 次。每小区之间筑埂并用塑料薄膜包裹，区组间设排灌沟，单灌单排。田间其他管理按常规进行。

表 1　不同处理氮肥施用方式

Table 1　N application methods of different treatments in the experiment

处理 Treatment	施 N 量 N application rate ($kg \cdot hm^{-2}$)	抑制剂类型 Inhibitor type	抑制剂添加量 Inhibitor rate ($kg \cdot hm^{-2}$)	施用方式 Application method
CK	—	—	—	—
U	180	—	—	一次性基施 One-off basal application
U+NBPT	180	NBPT	0.90	一次性基施 One-off basal application
U+NPPT	180	NPPT	0.90	一次性基施 One-off basal application
U+CP	180	CP	0.54	一次性基施 One-off basal application
U+NBPT+CP	180	NBPT+CP	0.90+0.54	一次性基施 One-off basal application
U+NPPT+CP	180	NPPT+CP	0.90+0.54	一次性基施 One-off basal application
U_3	180	—	—	基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶3∶2　Base∶tillering∶earing=5∶3∶2
U_3+NBPT	180	NBPT	0.90	基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶3∶2　Base∶tillering∶earing=5∶3∶2
U_3+NPPT	180	NPPT	0.90	基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶3∶2　Base∶tillering∶earing=5∶3∶2
U_3+CP	180	CP	0.54	基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶3∶2　Base∶tillering∶earing=5∶3∶2
U_3+NBPT+CP	180	NBPT+CP	0.90+0.54	基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶3∶2　Base∶tillering∶earing=5∶3∶2
U_3+NPPT+CP	180	NPPT+CP	0.90+0.54	基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶3∶2　Base∶tillering∶earing=5∶3∶2

NBPT: N-丁基硫代磷酰三胺; NPPT: N-丙基硫代磷酰三胺; CP: 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶。分次施肥(基肥、分蘖肥、穗肥)时间分别为 6 月 21 日、7 月 8 日、8 月 10 日。NBPT: N-(n-butyl) thiophosphoric triamide; NPPT: N-(n-propyl) thiophosphoric triamide; CP: 2-chloro-6(trichloromethyl) pyridine. The time of split fertilization (base, tillering and earing fertilizer) were 21 June, 8 July, and 10 August, respectively.

水稻生育期(6—10 月)气象温度数据由浙江省金华市气象站提供(图 1)，最高气温、最低气温及平均气温分别为 29.9 ℃、22.6 ℃、26.2 ℃。

1.4　测定项目及方法

分别于水稻分蘖盛期、孕穗期、抽穗期及成熟期，按各小区平均茎蘖数各取代表性稻株 5 穴，剪去根后，分茎鞘、叶和穗 3 部分烘干称重并粉碎，测定各器官中养分含量，用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮，凯氏定氮法测 N 含量，钒钼黄比色法测 P 含量，火焰光度法测 K 含量。成熟期各小区单收，按实收株数计产。

氮肥吸收利用效率计算方法如下:

N、P、K 素积累总量(total N, P, K accumulation, TNA, TPA, TKA): 成熟期单位面积植株(茎、叶和穗)N、P、K 积累量的总和。

收获指数(harvest index, HI)=成熟期籽粒干重/成熟期植株总干重　　(1)

N、P、K 收获指数(N, P, K harvest index, N, P, K HI)=成熟期单位面积植株籽粒 N、P、K 素积累量/植株该元素总积累量　　(2)

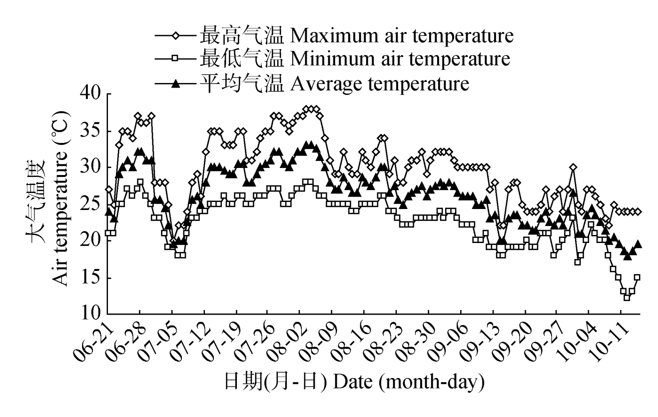


图 1 水稻生育期间气温

Fig. 1 Dynamic changes of air temperatures during rice growth stage

氮肥吸收利用率(N recovery efficiency, NRE)(%)=(施 N 区地上部植株吸 N 量−空白区地上部植株吸 N 量)/施 N 量×100% (3)

氮肥农学利用率(N agronomic efficiency, NAE)(kg·kg^{-1})=(施 N 区产量−空白区产量)/施 N 量 (4)

氮肥生理利用率(N physiological efficiency, NPE)(kg·kg^{-1})=(施 N 区产量−空白区产量)/(施 N 区地上部植株吸 N 量−空白区地上部植株吸 N 量) (5)

氮肥偏生产力(N partial factor productivity, NPFP)(kg·kg^{-1})=施 N 处理产量/施 N 量 (6)

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS17.0 数据分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 生化抑制剂组合与施肥模式对水稻干物质积累的影响

由表 2 可知，施肥模式对水稻分蘖盛期、成熟期干物质累积量及收获指数(HI)效应显著或极显著(P<0.05~0.001)，生化抑制剂组合对分蘖盛期、成熟期干物质累积量效应极显著(P<0.01~0.001)，两者交互效应对分蘖盛期干物质累积量效应显著(P<0.05)。整个生育期水稻干物质累积量呈上升趋势，各生育期均以 CK 处理最低。说明氮肥施用有利于水稻干物质的积累。分蘖盛期干物质累积量以 U、U3 处理最高，其他处理间差异不大。孕穗期和抽穗期施 N 处理间差异不大。

U3 处理水稻成熟期干物质累积量较 U 处理提高 3.0%。一次性施用中，施 N 处理较 CK 处理增幅为 33.8%~48.5%。与 U 处理相比，U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理成熟期干物质累积量分别提高 1.3%、5.3%、11.0%、7.7%和 9.3%。分次施用中，施 N 处理较 CK 处理增幅为 37.8%~55.3%。与 U3 处理相比，U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理成熟期干物质累积量分别提高 4.6%、3.3%、10.9%、10.1%和 12.7%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供 N 能力持续时间长，能显著提高水稻成熟期干物质积累，为高产奠定基础。U3 处理水稻 HI 较 U 处理提高 9.2%。一次性施用中，各抑制剂处理 HI 较 U 处理增幅为 5.1%~10.3%；分次施用中，各抑制剂处理 HI 较 U3 处理增幅为 1.0%~6.2%。

2.2 生化抑制剂组合与施肥模式对 N 素吸收、分配与利用率的影响

2.2.1 N 素吸收

由表 3 可知，施肥模式对水稻孕穗期、抽穗期、成熟期 N 素累积量(TNA)和抽穗后 N 素积累比例效应极显著(P<0.001)，生化抑制剂组合对 N 素吸收指标(抽穗期 TNA 除外)效应显著或极显著(P<0.05 或 0.001)，两者交互效应对分蘖盛期、孕穗期 TNA 和抽穗后 N 素积累显著(P<0.05)。整个生育期水稻 TNA 呈上升趋势，各生育期均以 CK 处理最低。说明氮肥施用有利于水稻 TNA 的积累。分蘖盛期 TNA 以 U、U3 处理最高，其他处理间差异不大。孕穗期施 N 处理间差异不大。抽穗期尿素分次施用均显著高于一次性施用。

U3 处理水稻成熟期 TNA 较 U 处理显著提高 11.0%。说明分次施肥有利于满足水稻的 N 素需求，可以显著增加水稻成熟期 TNA 累积。一次性施用中，施 N 处理较 CK 处理增幅为 67.0%~98.8%。与 U 处理相比，U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理成熟期 TNA 分别提高 9.2%、11.1%、19.0%、18.6%和 18.6%。分次施用中，施 N 处理较 CK 处理增幅为 85.4%~120.8%。与 U3 处理相比，U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理成熟期 TNA 分别提高 3.8%、4.8%、13.6%、15.8%和 19.1%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供 N 能力持续时间长，能显著提高水稻成熟期 TNA，为高产奠定基础。

U3 处理水稻抽穗后 N 素积累较 U 处理提高 8.2%。说明分次施肥有利于满足水稻的 N 素需求，可以增加水稻抽穗后 N 素累积。一次性施用中，施 N 处理较 CK 处理增幅为 54.5%~129.8%。与 U 处理相比，U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理抽穗后 N 素积累分别提高 27.0%、30.5%、48.0%、44.5%和 48.8%。分次施用中，施 N

表 2　不同生化抑制剂组合与施肥模式处理下水稻各生育期生物产量和收获指数

Table 2　Effects of different combinations of biochemical inhibitors and fertilization models on biomass at different growth stages and harvest index of rice

处理 Treatment	生物产量 Biomass (t·hm^{-2})				收获指数(HI) Harvest index (%)
	分蘖盛期 Mid-tillering stage	孕穗期 Panicle initiation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage	
CK	3.7±0.1e	6.3±0.2d	9.8±0.3b	11.2±0.3g	57.5±1.7a
U	4.7±0.1b	7.1±0.2bc	10.8±0.3a	15.0±0.4f	47.7±1.4d
U+NBPT	4.3±0.1cd	7.1±0.2bc	10.3±0.3ab	15.2±0.4ef	50.1±1.4cd
U+NPPT	4.0±0.1de	7.2±0.2bc	10.1±0.3ab	15.8±0.5cdef	52.5±1.5bc
U+CP	4.0±0.1de	8.0±0.2a	10.4±0.3ab	16.7±0.5abcd	51.5±1.5bcd
U+NBPT+CP	4.3±0.1cd	7.1±0.2bc	10.2±0.3ab	16.2±0.5abcdef	52.6±1.5bc
U+NPPT+CP	3.8±0.1e	7.3±0.2bc	10.6±0.3ab	16.4±0.5abcde	51.1±1.5bcd
U3	5.4±0.2a	7.0±0.2bc	10.9±0.3a	15.5±0.4def	52.1±1.5bcd
U3+NBPT	4.5±0.1bc	6.9±0.2bc	10.5±0.3ab	16.2±0.5abcdef	52.6±1.5bc
U3+NPPT	4.0±0.1de	6.8±0.2cd	10.4±0.3ab	16.0±0.5bcdef	52.7±1.5bc
U3+CP	4.8±0.1b	7.1±0.2bc	10.9±0.3a	17.2±0.5ab	53.3±1.5abc
U3+NBPT+CP	4.7±0.1b	7.5±0.2ab	10.8±0.3a	17.0±0.5abc	55.3±1.6ab
U3+NPPT+CP	4.0±0.1de	7.1±0.2bc	10.7±0.3ab	17.4±0.5a	54.2±1.6abc
ANOVA					
F	***	ns	ns	*	**
I	***	ns	ns	**	ns
F × I	*	ns	ns	ns	ns

F: 施肥模式; I: 抑制剂组合; F×I: 施肥模式×抑制剂组合。表中数值为平均值±标准误(n=3)。同列不同字母表示处理间 0.05 水平差异显著(LSD 检验)。*, **和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。F: fertilizer model; I: inhibitor combination; F×I: fertilizer model × inhibitor combination. Data in the table are Mean ± SE (n=3). Values followed by different letters are significantly different at P < 0.05 (LSD). *, ** and *** mean significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

表 3　不同生化抑制剂组合与施肥模式处理下水稻各生育期 N 素吸收和 N 收获指数

Table 3　Effects of different combinations of biochemical inhibitors and fertilization models on N uptake at different growth stages and N harvest index of rice

处理 Treatment	N 素累积量(TNA) Total nitrogen accumulation (kg·hm^{-2})				N 收获指数 (NHI) Nitrogen harvest index (%)	抽穗后 N 素积累 N accumulation after heading (kg·hm^{-2})	抽穗后 N 素积累比例 N accumulation ratio after heading (%)
	分蘖盛期 Mid-tillering stage	孕穗期 Panicle initiation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage			
CK	24.0±0.7g	25.5±0.7g	42.2±1.2c	72.8±2.1g	61.9±1.8abc	30.3±0.9i	41.6±1.2cde
U	51.7±1.5a	48.9±1.4f	74.8±2.2b	121.6±3.5f	56.7±1.6d	46.8±1.4h	38.5±1.1ef
U+NBPT	43.2±1.3cd	52.1±1.5ef	73.3±2.1b	132.7±3.8ef	57.7±1.7bcd	59.4±1.7def	44.8±1.3abc
U+NPPT	39.3±1.1ef	52.5±1.5ef	74.0±2.1b	135.1±3.9de	60.0±1.7abcd	61.1±1.8de	45.2±1.3abc
U+CP	45.2±1.3bc	60.9±1.8ab	75.5±2.2b	144.7±4.2bcd	61.3±1.8abcd	69.3±2.0ab	47.9±1.4a
U+NBPT+CP	40.9±1.2def	58.0±1.7abc	76.7±2.2b	144.3±4.2cde	59.6±1.7abcd	67.6±2.0bc	46.9±1.4ab
U+NPPT+CP	37.6±1.1f	52.7±1.5def	74.6±2.2b	144.2±4.2cde	62.3±1.8abc	69.6±2.0ab	48.3±1.4a
U3	49.0±1.4a	57.2±1.6bcd	84.4±2.4a	135.0±3.9de	57.6±1.7cd	50.6±1.5gh	37.5±1.1f
U3+NBPT	48.2±1.4ab	55.0±1.6cde	84.8±2.4a	140.2±4.0de	62.1±1.8abc	55.4±1.6fg	39.5±1.1ef
U3+NPPT	39.1±1.1ef	58.5±1.7abc	84.8±2.5a	141.5±4.1de	60.0±1.7abcd	56.7±1.6ef	40.0±1.2def
U3+CP	44.7±1.3bc	57.6±1.7abc	89.6±2.6a	153.3±4.4abc	62.9±1.8a	63.7±1.8cd	41.6±1.2cde
U3+NBPT+CP	43.7±1.3cd	61.9±1.8a	88.3±2.5a	156.3±4.5ab	62.8±1.8ab	68.0±2.0bc	43.5±1.3bcd
U3+NPPT+CP	41.7±1.2cde	58.2±1.7abc	86.6±2.5a	160.8±4.6a	63.9±1.8a	74.2±2.1a	46.2±1.3ab
ANOVA							
F	ns	***	***	***	ns	ns	***
I	***	***	ns	***	*	***	***
F × I	*	*	ns	ns	ns	*	ns

F: 施肥模式; I: 抑制剂组合; F×I: 施肥模式×抑制剂组合。表中数值为平均值±标准误(n=3)。同列不同字母表示处理间 0.05 水平差异显著(LSD 检验)。*, **和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。F: fertilizer model; I: inhibitor combination; F×I: fertilizer model × inhibitor combination. Data in the table are Mean ± SE (n=3). Values followed by different letters are significantly different at P < 0.05 (LSD). *, ** and *** mean significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

处理较 CK 处理增幅为 67.2%~145.0%。与 U3 处理相比, U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理抽穗后 N 素积累分别提高 9.3%、11.9%、25.8%、34.3%和 46.5%。说明施用尿素添加抑制剂能提高水稻抽穗后 N 素累积, 有利于保持抽穗后 N 素同化能力和吸收能力。U3 处理水稻 N 素收获指数(NHI)较 U 处理提高 1.7%。一次性施用中, 各抑制剂处理 NHI 较 U 处理增幅为 1.9%~10.0%; 分次施用中, 各抑制剂处理 NHI 较 U3 处理增幅为 4.2%~11.0%。

2.2.2 氮肥利用率

由表 4 可知, 施肥模式对水稻 NRE、NAE 和 NPFP 效应极显著(P<0.01~0.001), 生化抑制剂组合对氮肥利用率指标效应均极显著(P<0.001), 两者交互效应对 NAE 和 NPE 极显著(P<0.01~0.001)。

U3 处理水稻 NRE、NAE 和 NPFP 较 U 处理显著提高 27.5%、70.8%和 14.2%。说明分次施肥有利于满足水稻的 N 素需求, 可以显著增加水稻 NRE、NAE 和 NPFP。与 U 处理相比, U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理 NRE 分别提高 22.8%、27.6%、47.4%、46.4%和 46.4%; NAE 分别提高 113.7%、111.1%、100.2%、120.3%和 128.7%; NPFP 分别提高 22.8%、22.2%、20.1%、24.1%和 25.8%。与 U3 处理相比, U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理 NRE 分别提高 8.3%、10.4%、29.4%、34.3%和 41.4%; NAE 分别提高 36.0%、45.0%、42.7%、40.1%和 52.6%; NPFP 分别提高 10.8%、13.5%、12.8%、12.0%和 15.8%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供 N 能力持续时间长, 能提高水稻 NRE、NAE 和 NPFP, 为高产奠定基础。

2.2.3 N 素分配

由图 2 可知, 成熟期 N 素在水稻植株中的分配大小表现为穗>茎>叶。分次施用水稻穗和叶中 N 素累积量较一次性施用高, 茎中则相反。说明分次施肥有利于满足水稻的 N 素需求, 促进茎中 N 素转运, 增加穗中 N 素积累。

2.3 生化抑制剂组合与施肥模式对 **P** 素吸收与分配的影响

2.3.1 **P** 素吸收

由表 5 可知, 施肥模式对水稻分蘖盛期、孕穗期 P 素累积量(TPA)和 P 收获指数(PHI)效应显著或极

表 4 不同生化抑制剂组合与施肥模式处理下水稻氮肥利用率

Table 4 Effects of different combinations of biochemical inhibitors and fertilization models on N use efficiency of rice

处理 Treatment	氮肥吸收利用率(NRE) N recovery efficiency (%)	氮肥农学利用率(NAE) N agronomic efficiency (kg·kg^{-1})	氮肥偏生产力(NPFP) N partial factor productivity (kg·kg^{-1})	氮肥生理利用率(NPE) N physiological efficiency (kg·kg^{-1})
CK	—	—	—	—
U	27.1±0.8f	7.3±0.2h	36.6±1.1d	27.0±0.8f
U+NBPT	33.3±1.0e	15.6±0.5def	44.9±1.3abc	47.0±1.4a
U+NPPT	34.6±1.0de	15.5±0.4ef	44.7±1.3abc	44.6±1.3ab
U+CP	40.0±1.2c	14.7±0.4f	43.9±1.3bc	36.7±1.1e
U+NBPT+CP	39.7±1.1c	16.1±0.5cde	45.4±1.3abc	40.6±1.2cd
U+NPPT+CP	39.7±1.1c	16.7±0.5bcde	46.0±1.3abc	42.2±1.2bc
U3	34.6±1.0de	12.5±0.4g	41.7±1.2c	36.2±1.0e
U3+NBPT	37.4±1.1cd	17.0±0.5bcd	46.3±1.3ab	45.4±1.3ab
U3+NPPT	38.2±1.1c	18.1±0.5ab	47.4±1.4ab	47.5±1.4a
U3+CP	44.7±1.3b	17.8±0.5ab	47.1±1.4ab	39.9±1.2cde
U3+NBPT+CP	46.4±1.3ab	17.5±0.5bc	46.8±1.4ab	37.7±1.1de
U3+NPPT+CP	48.9±1.4a	19.1±0.5a	48.3±1.4a	39.0±1.1cde
ANOVA				
F	***	***	**	ns
I	***	***	***	***
F × I	ns	**	ns	***

F: 施肥模式; I: 抑制剂组合; F×I: 施肥模式×抑制剂组合。表中数值为平均值±标准误(n=3)。同列不同字母表示处理间 0.05 水平差异显著(LSD 检验)。*, **和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。F: fertilizer model; I: inhibitor combination; F×I: fertilizer model × inhibitor combination. Data in the table are Mean ± SE (n=3). Values followed by different letters are significantly different at P < 0.05 (LSD). *, ** and *** mean significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

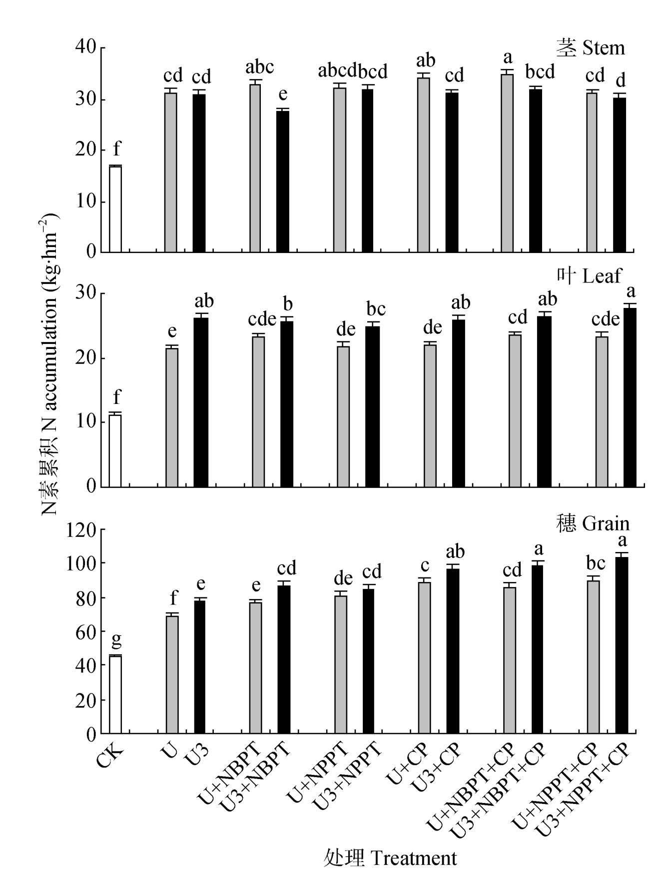


图 2　不同生化抑制剂组合与施肥模式处理下水稻成熟期植株各器官 N 素分配

Fig. 2　Effects of different combinations of biochemical inhibitors and fertilization models on proportions of N accumulation in stems, leaves, and grains of rice at maturity

柱上不同小写字母表示处理间差异在 5%水平显著(LSD 检验)。图中数值为平均值±标准误(n=3)。Different small letters above the bars mean significant differences among treatments at 5% level (LSD). Data in the figure are Mean ± SE (n=3).

显著(P<0.05 或 0.001), 生化抑制剂组合对 P 素吸收指标(PHI 除外)效应显著或极显著(P<0.05 或 0.001), 两者交互效应对分蘖盛期 TPA 显著(P<0.05)。整个生育期水稻 TPA 呈上升趋势, 各生育期均以 CK 处理最低。说明氮肥施用有利于水稻 TPA 的积累。分蘖盛期 TPA 以 U、U3 处理最高, 其他处理间差异不大。孕穗期、抽穗期施 N 处理间 TPA 差异不大。

U3 处理水稻成熟期 TPA 较 U 处理提高 0.9%。说明分次施肥有利于满足水稻的 P 素需求, 可以增加成熟期 TPA 累积。一次性施用中, 施 N 处理较 CK 处理增幅为 54.8%~68.7%。与 U 处理相比, U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理成熟期 TPA 分别提高 6.7%、6.1%、9.0%、8.9% 和 8.5%。分次施用中, 施 N 处理较 CK 处理增幅为 56.2%~77.0%。与 U3 处理相比, U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理成熟期 TPA 分别提高 6.7%、6.1%、13.3%、8.7% 和 10.6%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供 N 能力持续时间长, 能提高水稻成熟期 TPA, 为高产奠定基础。

2.3.2　P 素分配

由图 3 可知, 成熟期 P 素在水稻植株中的分配大小表现为穗>茎>叶。尿素分次施用水稻穗中 P 素累积量较一次性施用高, 茎中则相反; 叶中抑制剂处理低于一次性施用。说明分次施肥配施抑制剂有利于满足水稻的 P 素需求, 降低茎叶中 P 素分配, 提高穗中 P 素积累。

2.4　生化抑制剂组合与施肥模式对 K 素吸收与分配的影响

2.4.1　K 素吸收

由表 6 可知, 施肥模式对水稻各生育期 K 素累积量(TKA)(孕穗期除外)和 K 收获指数(KHI)效应显著或极显著(P<0.05 或 0.001), 生化抑制剂组合对分蘖盛期、孕穗期 TKA 和 KHI 效应显著或极显著(P<0.05 或 0.001), 两者交互效应对 KHI 极显著(P<0.01)。整个生育期水稻 TKA 呈 S 型曲线, 于抽穗期达到峰值, 各生育期均以 CK 处理最低。说明氮肥施用有利于水稻 TKA 的积累。分蘖盛期以 U、U3 处理最高, 其他处理间差异不大。孕穗期、抽穗期施 N 处理间 TKA 差异不大。

U3 处理水稻成熟期 TKA 较 U 处理提高 4.2%。说明分次施肥有利于满足水稻的 K 素需求, 可以增加成熟期 TKA 累积。一次性施用中, 施 N 处理成熟期 TKA 较 CK 处理增幅为 50.8%~63.5%。与 U 处理相比, U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理分别提高 8.1%、8.2%、8.4%、6.8%和 5.6%。分次施用中, 施 N 处理成熟期 TKA 较 CK 处理增幅为 57.1%~73.0%。与 U3 处理相比, U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理分别提高 5.9%、6.5%、8.0%、4.8% 和 10.1%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供 N 能力持续时间长, 能提高水稻 TKA, 为高产奠定基础。

2.4.2　K 素分配

由图 4 可知, 成熟期 K 素在水稻植株中的分配大小表现为茎和叶>穗。尿素分次施用穗和叶中 K 素累积量较一次性施用高, 茎中则相反。说明分次施肥有利于满足水稻的 K 素需求, 促进茎中 K 素转运, 提高穗中 K 素积累。

表 5 不同生化抑制剂组合与施肥模式处理下水稻各生育期 P 素吸收和 P 收获指数

Table 5 Effects of different combinations of biochemical inhibitors and fertilization models on P uptake at different growth stages and P harvest index of rice

处理 Treatment	P 素累积量(TPA) Total phosphorus accumulation ($kg \cdot hm^{-2}$)				P 收获指数(PHI) Phosphorus harvest index (%)
	分蘖盛期 Mid-tillering stage	孕穗期 Panicle initiation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage	
CK	9.2±0.3g	11.1±0.3d	22.5±0.6f	33.3±1.0d	57.4±1.7de
U	14.2±0.4b	15.5±0.4a	26.7±0.8de	51.6±1.5c	58.2±1.7cde
U+NBPT	11.7±0.3de	15.7±0.5a	28.9±0.8bcd	55.1±1.6abc	58.0±1.7cde
U+NPPT	11.1±0.3def	13.9±0.4bc	27.4±0.8cde	54.8±1.6abc	59.2±1.7bcde
U+CP	10.6±0.3f	15.5±0.4a	29.9±0.9b	56.2±1.6ab	57.9±1.7cde
U+NBPT+CP	11.1±0.3def	13.6±0.4c	28.0±0.8bcd	56.2±1.6ab	59.0±1.7bcde
U+NPPT+CP	10.2±0.3f	13.2±0.4c	29.8±0.9b	56.0±1.6abc	56.8±1.6e
U3	15.8±0.5a	15.6±0.5a	25.5±0.7e	52.1±1.5bc	64.3±1.9a
U3+NBPT	11.6±0.3de	15.7±0.5a	29.9±0.9b	55.6±1.6abc	61.1±1.8abcde
U3+NPPT	10.8±0.3ef	13.8±0.4bc	27.8±0.8bcde	55.3±1.6abc	62.1±1.8abcd
U3+CP	12.8±0.4c	15.8±0.5a	33.2±1.0a	59.0±1.7a	63.4±1.8ab
U3+NBPT+CP	11.8±0.3cd	15.3±0.4a	29.7±0.9bc	56.6±1.6ab	64.0±1.8ab
U3+NPPT+CP	10.9±0.3def	15.0±0.4ab	29.2±0.8bc	57.6±1.7a	62.5±1.8abc
ANOVA					
F	***	*	ns	ns	***
I	***	***	***	*	ns
F × I	*	ns	ns	ns	ns

F: 施肥模式; I: 抑制剂组合; F×I: 施肥模式×抑制剂组合。表中数值为平均值±标准误(n=3)。同列不同字母表示处理间 0.05 水平差异显著(LSD 检验)。*, **和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。F: fertilizer model; I: inhibitor combination; F×I: fertilizer model ×inhibitor combination. Data in the table are Mean ± SE (n=3). Values followed by different letters are significantly different at $P < 0.05$ (LSD). *, ** and *** mean significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

2.5 N、P、K 吸收量与籽粒产量的关系

由图 5 可知，不同施肥模式下水稻植株对 N、P、K 的吸收量与籽粒产量呈极显著的正相关关系，且随着籽粒产量的增加而增加。说明充足的 N、P、K 肥供应是水稻高产栽培的基础。尿素分次施用 N、P、K 吸收量与籽粒产量的相关系数(r_N=0.972**、r_P=0.985**、r_K=0.988**)均较一次性施肥(r_N=0.951**、r_P=0.936**、r_K=0.929**)高。说明分次施肥有利于满足水稻的 N、P、K 需求，提高养分吸收累积，从而达到高产。

3 讨论

3.1 施肥模式对水稻氮肥吸收利用的影响

库容量大和生物产量高是超级杂交稻高产的决定因素[31-33]，理想栽培技术是在碳水化合物的运输与分配上形成“源”至“库”的畅流。穗肥 N 作为水稻高产的后期生殖生长需要，其准确比例依赖于超级稻栽培的土壤理化性质、缓释性化肥或缓效性有机肥等肥料类型、影响肥料损失的立地气候条件和超级稻品种等作用因子[34]。彭显龙等[35-36]研究表明，寒地水稻吸 N 高峰出现在幼穗分化始期；在穗分化期到减数分裂期，以及减数分裂期到抽穗期吸收 N 速度较快，吸 N 量大。敖和军等[37]研究得出，超级杂交稻在其生育后期(抽穗至成熟)的 N 素吸收量高，有利于充实籽粒，提高结实率和 NHI。本研究结果表明，分次施肥处理水稻抽穗后 N 素积累较一次性施肥处理提高 8.2%，有效增加生育后期 N 素储量。成熟期 N 素吸收量与籽粒产量呈极显著正相关(一次性：r_N=0.972**；分次：r_N=0.951**)，为水稻高产奠定基础。水稻生长前期根系不发达，对 N 素吸收能力较弱，积累量较少，不同的 N 素比例对水稻 TNA 影响差异不明显。随着植株的长大，对养分需求迅速增多，而增加中后期氮肥施用量，从而把施 N 量与水稻对 N 素的大量需求相结合，增加 N 素积累吸收，与相关研究一致[38-39]。

江立庚等[40]研究发现，相同施 N 水平下提高穗肥比率可增加 N 素回收效率、积累总量和运转效率，降低 N 素生产效率。吴文革等[26]研究发现，前 N 后移增施穗肥为水稻整个生育期提供比较平衡的 N 素供应，可促进 N 素吸收，当季利用率随穗肥比例提高而增加。薛利红等[41]研究发现，基肥用量增加降低水稻生育后期功能叶的叶片含 N 量，从而降低成熟期植株 N 积累量及穗部 N 分配系数，NAE 和 NRE

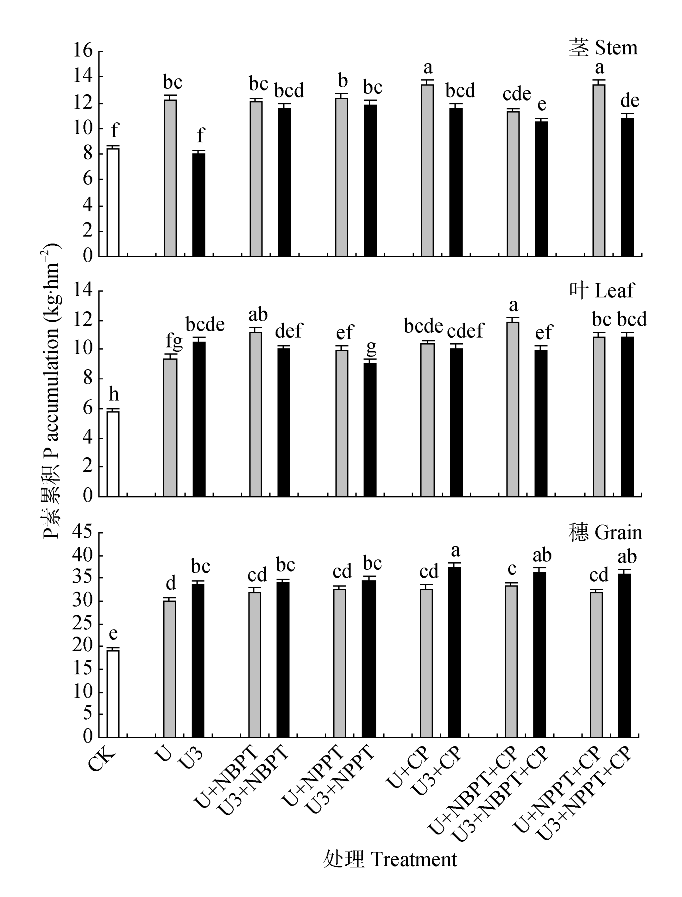


图 3　不同生化抑制剂组合与施肥模式处理下水稻成熟期植株各器官 **P** 素分配

Fig. 3　Effects of different combinations of biochemical inhibitors and fertilization models on proportions of P accumulation in stems, leaves, and grains of rice at maturity

柱上不同小写字母表示处理间差异在 5%水平显著(LSD 检验)。图中数值为平均值±标准误(n=3)。Different small letters above the bars mean significant differences among treatments at 5% level (LSD). Data in the figure are Mean ± SE (n=3).

明显降低, N 素转运率与基肥用量呈二次曲线关系。林忠成等[42]研究发现, 基蘖肥占总施 N 量 60%~70%时, 双季稻具有较高的干物质积累量、N 素积累量、NRE、NAE, 群体碳氮代谢也比较协调。李木英等[43]研究发现, 适量增施穗肥可提高 N 素的物质生产力和稻谷生产力, 提高 N 素吸施比和 TNA。本研究结果表明, 分次施肥较一次性施肥水稻成熟期 N、P、K 吸收量, 及 NRE、NAE 和 NPFP 显著增加。N 素前期供应过多, 基蘖肥占比大, 植株容易奢侈吸收, 产生大量无效分蘖, 增加拔节期吸 N 量及无效分蘖吸 N 量, 拔节前群体增加, 群体过大, 无效生长增加, 有效的茎蘖个体弱小, 颖花数不足, 库容缩小, 从而降低后期的吸 N 量导致减产, 与相关研究一致[35,43-44]。

3.2　抑制剂对水稻氮肥吸收利用的影响

稻田土壤施用硝化抑制剂后使田面水中 N 素更多地以 NH_4^+-N 形式存在[45]。水稻作为喜 NH_4^+-N 作物, 足量 NH_4^+-N 的存在促进其对 N 素的吸收和利用[13,46]。脲酶/硝化抑制剂[氢醌(HQ)/双氰胺(DCD)]配施提高土壤中 NH_4^+-N 浓度, 植株以 NH_4^+-N 形式吸收 N 同时增加对 P 的吸收, 促进作物生长[47]。许超等[13]研究发现, 尿素中添加 3,4-二甲基吡唑磷酸盐(DMPP)能提高水稻植株地上部及籽粒的吸 N 量, 促进水稻 N 素营养, 提高产量。刘彦伶等[18]研究发现, 100% CP 处理早稻和晚稻 NRE 显著提高 27.3%和 78.3%。彭玉净等[48]研究发现, NBPT 减缓稻田尿素水解, 显著降低氨挥发, 且水稻产量和吸 N 量有所提高, 肥料 N 的土壤残留量增加。叶会财等[49]研究发现, 添加 0.75%NBPT 红壤双季稻增产 14.75%, NAE 提高 18.41%。本研究结果表明, 生化抑制剂组合结合施肥模式提高抽穗后干物质和 N 素积累及其占总干物质和总 N 素积累的比例, 有利于保持抽穗后 N 素同化和吸收能力。一次性施用中, 各抑制剂处理 NRE、NAE 和 NPFP 较 U 处理分别提高 22.8%~47.4%、100.2%~128.7%和 20.1%~25.8%; 分次施用中, 各抑制剂处理 NRE、NAE 和 NPFP 较 U3 处理分别提高 8.3%~41.4%、36.0%~52.6%和 10.8%~ 15.8%。

脲酶抑制剂减缓水稻分蘖期尿素水解和 N 素损失, 提高孕穗期土壤 NH_4^+-N 含量, 显著增加水稻产量和氮肥利用率[50]。硝化抑制剂能够抑制 NH_4^+-N 向硝态氮(NO_3^--N)转化来降低 N 素损失, 减少氮氧化物排放量[51]。脲酶和硝化抑制剂存在一定的协同作用[52], 配合施用较单独施用能更有效提高氮肥回收率和降低稻株根际土壤 N 素损失[53]。孙海军等[19]研究发现, 添加 CP 分别提高 25.0%[180 kg(N)·hm^{-2}]和 12.1%[240 kg(N)·hm^{-2}]的 ^{15}N 吸收利用率。张文学等[50]研究发现, 与传统施 N[180 kg(N)·hm^{-2}]处理相比, 减 25%N+NBPT 早、晚稻氮肥当季利用率分别提高 6.78%和 9.46%。李敏等[54]研究发现, 等 N 施用稳定氮肥(HQ+DCD)较农民习惯施肥促进水稻对 N 素的吸收累积, 分次施用差异显著。本研究结果表明, 不同施肥模式下配施抑制剂组合(NBPT、NPPT/+CP)显著增加水稻 N、P、K 吸收量, 促进抽穗后干物质生产和 N 素积累, 提高籽粒中的养分分配及 N 素利用效率。

4　结论

黄泥田地区生化抑制剂组合与施肥模式结合, 能为水稻整个生育期提供比较平衡的 N 素供应, 促进水稻生长, 有利于 N、P、K 的吸收和利用及抽穗

表 **6** 不同生化抑制剂组合与施肥模式处理下水稻各生育期 K 素吸收和 K 收获指数的影响

Table 6 Effects of different combinations of biochemical inhibitors and fertilization models on K uptake at different growth stages and K harvest index of rice

处理 Treatment	K 素累积量(TKA) Total potassium accumulation ($kg\cdot hm^{-2}$)				K 收获指数(KHI) Potassium harvest index (%)
	分蘖盛期 Mid-tillering stage	孕穗期 Panicle initiation stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturity stage	
CK	70.3±2.0g	116.0±3.3e	136.4±3.9e	111.5±3.2d	15.6±0.5a
U	109.4±3.2b	171.0±4.9bcd	186.4±5.4bcd	168.1±4.9c	10.4±0.3f
U+NBPT	94.0±2.7cde	159.3±4.6d	188.5±5.4bcd	181.8±5.3abc	11.0±0.3ef
U+NPPT	89.8±2.6def	169.9±4.9bcd	183.9±5.3bcd	182.0±5.3abc	11.7±0.3cde
U+CP	87.9±2.5ef	182.2±5.3ab	194.6±5.6abcd	182.2±5.3abc	11.9±0.3bcde
U+NBPT+CP	90.8±2.6de	175.5±5.1abc	178.7±5.2d	179.6±5.2abc	12.1±0.3bcd
U+NPPT+CP	82.5±2.4f	180.4±5.2abc	183.3±5.3cd	177.6±5.1bc	12.0±0.3bcd
U3	119.7±3.5a	176.0±5.1abc	197.3±5.7abc	175.2±5.1bc	12.3±0.4bcd
U3+NBPT	95.9±2.8cd	169.4±4.9bcd	193.2±5.6abcd	185.6±5.4ab	11.6±0.3de
U3+NPPT	87.0±2.5ef	166.8±4.8cd	195.0±5.6abc	186.5±5.4ab	12.2±0.4bcd
U3+CP	101.5±2.9bc	174.4±5.0abc	206.3±6.0a	189.2±5.5ab	12.1±0.3bcd
U3+NBPT+CP	101.4±2.9c	185.7±5.4a	199.4±5.8ab	183.6±5.3ab	12.9±0.4b
U3+NPPT+CP	87.6±2.5ef	179.0±5.2abc	206.4±6.0a	192.8±5.6a	12.6±0.4bc
ANOVA					
F	***	ns	***	*	***
I	***	*	ns	ns	***
F × I	ns	ns	ns	ns	**

F: 施肥模式; I: 抑制剂组合; F×I: 施肥模式×抑制剂组合。表中数值为平均值±标准误(n=3)。同列不同字母表示处理间 0.05 水平差异显著(LSD 检验)。*, **和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。F: fertilizer model; I: inhibitor combination; F×I: fertilizer model × inhibitor combination. Data in the table are Mean ± SE (n=3). Values followed by different letters are significantly different at P < 0.05 (LSD). *, ** and *** mean significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively.

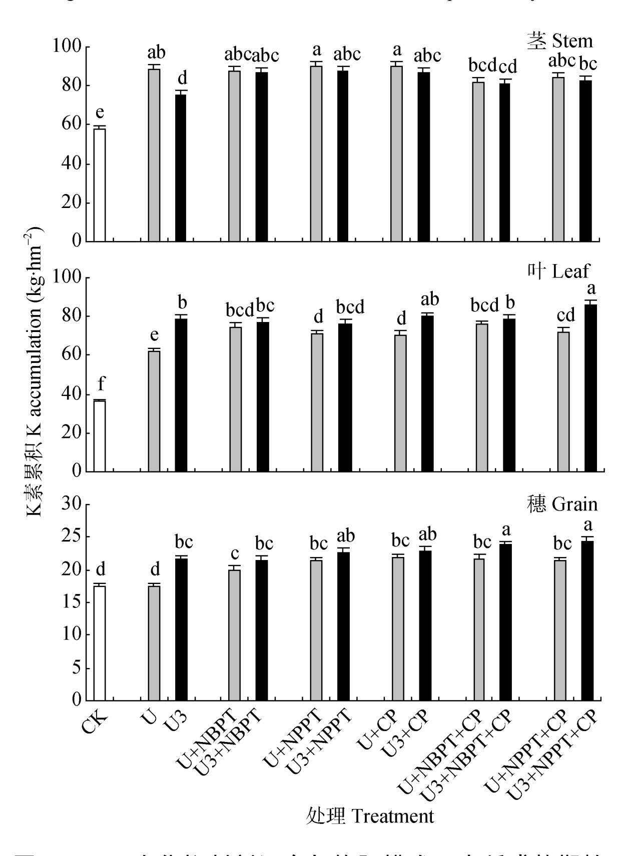


图 **4** 不同生化抑制剂组合与施肥模式下水稻成熟期植株各器官 K 素分配

Fig. 4 Effects of different combinations of biochemical inhibitors and fertilization models on proportions of K accumulation in stems, leaves, and grains of rice at maturity

柱上不同小写字母表示处理间差异在 5%水平显著(LSD 检验)。图中数值为平均值±标准误(n=3)。Different small letters above the bars mean significant differences among treatments at 5% level (LSD). Data in the figure are Mean ± SE (n=3).

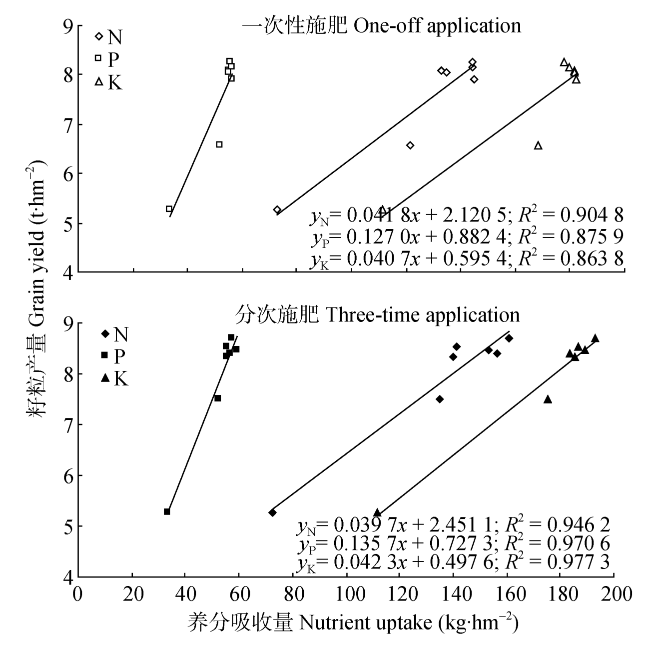


图 **5** 一次性施肥和分次施肥模式下水稻 **N**、**P**、**K** 吸收量与稻谷产量的关系

Fig. 5 Relationship between grain yield of rice and N, P, K uptakes under one-off application and three-time application of fertilizer

后 N 素积累，提高穗中 N、P、K 养分累积和氮肥当季利用效率(NRE、NAE 和 NPFP)，增加植株生物量，显著提高产量。

参考文献 References

[1] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095–1103

Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095–1103

[2] 朱兆良, 张绍林, 尹斌, 等. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 1–5
Zhu Z L, Zhang S L, Yin B, et al. Historical comparison on the response curves of rice yield-nitrogen application rate in Tai-lake region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(1): 1–5

[3] Liu X J, Ai Y W, Zhang F S, et al. Crop production, nitrogen recovery and water use efficiency in rice-wheat rotation as affected by non-flooded mulching cultivation (NFMC)[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 71(3): 289–299

[4] 刘瑜, 串丽敏, 安志装, 等. 硝化抑制剂双氰胺对褐土中尿素转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2496–2502
Liu Y, Chuan L M, An Z Z, et al. Effects of nitrification inhibitor dicyandiamide on ammonium and nitrate nitrogen transformations in cinnamon soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(12): 2496–2502

[5] Bodirsky B L, Popp A, Lotze-Campen H, et al. Reactive nitrogen requirements to feed the world in 2050 and potential to mitigate nitrogen pollution[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3858

[6] Chien S H, Prochnow L I, Cantarella H. Recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts[J]. Advances in Agronomy, 2009, 102: 267–322

[7] Trenkel M E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture[R]. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010

[8] Malhi S S, Grant C A, Johnston A M, et al. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: A review[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 60(3/4): 101–122

[9] 孙志梅, 武志杰, 陈利军, 等. 土壤硝化作用的抑制剂调控及其机理[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1389–1395
Sun Z M, Wu Z J, Chen L J, et al. Regulation of soil nitrification with nitrification inhibitors and related mechanisms[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1389–1395

[10] 徐星凯, 周礼恺, Van Cleemput O. 脲酶抑制剂/硝化抑制剂对植稻土壤中尿素 N 行为的影响[J]. 生态学报, 2001, 21(10): 1682–1686
Xu X K, Zhou L K, Van Cleemput O. Effect of urease/nitrification inhibitors on the behavior of urea-N in the soil planted to rice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(10): 1682–1686

[11] 陈振华, 陈利军, 武志杰. 脲酶-硝化抑制剂对减缓尿素转化产物氧化及淋溶的作用[J]. 应用生态学报, 2005, 16(2): 238–242
Chen Z H, Chen L J, Wu Z J. Effects of urease and nitrification inhibitors on alleviating the oxidation and leaching of soil urea's hydrolyzed product ammonium[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2): 238–242

[12] 黄益宗, 冯宗炜, 张福珠. 硝化抑制剂硝基吡啶在农业和环境保护中的应用[J]. 土壤与环境, 2001, 10(4): 323–326
Huang Y Z, Feng Z W, Zhang F Z. Application of nitrapyrin in agriculture and environmental protection[J]. Soil and Environmental Sciences, 2001, 10(4): 323–326

[13] 许超, 吴良欢, 郑寨生, 等. 含硝化抑制剂(DMPP)氮肥对水稻产量及氮素吸收的影响[J]. 浙江农业科学, 2003, (2): 75–78
Xu C, Wu L H, Zheng Z S, et al. Effects of a nitrogen fertilizer containing nitrification inhibitor (DMPP) on yield and uptake of nitrogen in rice[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2003, (2): 75–78

[14] Zaman M, Saggar S, Blennerhassett J D, et al. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1270–1280

[15] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻籽粒品质性状与土壤肥力因子的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 283–290
Wang F, Lin C, Li Q H, et al. Effects of long term fertilization on rice grain qualities and soil fertility factors in yellow paddy fields of southern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 283–290

[16] 林诚, 王飞, 李清华, 等. 不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (6): 24–27
Lin C, Wang F, Li Q H, et al. Effects of different fertilizer application strategies on nutrients and enzymatic activities in yellow clayey soil[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2009, (6): 24–27

[17] 张宣. 南方中低产黄泥田科学施肥技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
Zhang X. Study on rational fertilization technology of low-medium yielding yellow-clayed paddy field in south China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014

[18] 刘彦伶, 来庆, 徐阜增, 等. 不同氮肥类型对黄泥田双季稻产量及氮素利用的影响[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2013, 39(4): 403–412
Liu Y L, Lai Q, Xu H Z, et al. Effects of different types of nitrogen fertilizers on grain yield and nitrogen utilization of double-cropping rice in yellow clayey soil[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences, 2013, 39(4): 403–412

[19] 孙海军, 闵炬, 施卫明. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. 土壤, 2015, 47(6): 1027–1033
Sun H J, Min J, Shi W M. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field[J]. Soils, 2015, 47(6): 1027–1033

[20] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. 作物学报, 2005, 31(11): 1422–1428
Ye Q B, Zhang H C, Wei H Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(11): 1422–1428

[21] 冯涛, 杨京平, 孙军华, 等. 两种土壤不同施氮水平对稻田系统的氮素利用及环境效应影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 64–67

Feng T, Yang J P, Sun J H, et al. Effect of different nitrogen application levels on nitrogen utilization of paddy field system and environment impact under two soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(1): 64–67
[22] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 等. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 616–621
Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W, et al. Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 616–621
[23] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1–6
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1–6
[24] 张洪程, 王秀芹, 戴其根, 等. 施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 800–806
Zhang H C, Wang X Q, Dai Q G, et al. Effects of N-application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice variety liangyoupeijiu[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(7): 800–806
[25] Jiang L G, Dai T B, Jiang D, et al. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars[J]. Field Crops Research, 2004, 88(2/3): 239–250
[26] 吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 757–764
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J, et al. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 757–764
[27] 冯惟珠, 苏祖芳, 杜永林, 等. 水稻灌浆期源质量与产量关系及氮素调控的研究[J]. 中国水稻科学, 2000, 14(1): 24–30
Feng W Z, Su Z F, Du Y L, et al. Relationship between source quality and grain yield during filling period in rice and its nitrogen-regulation approach[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2000, 14(1): 24–30
[28] 唐启源, 邹应斌, 米湘成, 等. 不同施氮条件下超级杂交稻的产量形成特点与氮肥利用[J]. 杂交水稻, 2003, 18(1): 44–48
Tang Q Y, Zou Y B, Mi X C, et al. Grain yield construction and N fertilizer efficiency of super hybrid rice under different N applications[J]. Hybrid Rice, 2003, 18(1): 44–48
[29] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 新型磷酰胺类脲酶抑制剂对不同质地土壤尿素转化的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12): 4003–4012
Zhou X, Wu L H, Dai F. Influence of a new phosphoramide urease inhibitor on urea-N transformation in different texture soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12): 4003–4012
[30] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 生化抑制剂组合对黄泥田土壤尿素态氮转化的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 95–100
Zhou X, Wu L H, Dai F. Effects of combined biochemical inhibitors on transformation of urea-N in yellow clayey soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 95–100
[31] 朱德峰, 林贤青, 陈苇, 等. 超级稻协优 9308 营养特性与施肥技术[J]. 中国稻米, 2002, 8(2): 18–19
Zhu D F, Lin X Q, Chen W, et al. Nutrition characteristics and fertilization of Xieyou 9308[J]. China Rice, 2002, 8(2): 18–19
[32] 邹应斌, 敖和军, 王淑红, 等. 超级稻“三定”栽培法研究 Ⅰ 概念与理论依据[J]. 中国农学通报, 2006, 22(5): 158–162
Zou Y B, Ao H J, Wang S H, et al. Studies on San-Ding cultivation method for super rice Ⅰ. The concept and the principle[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(5): 158–162
[33] 吴文革, 张洪程, 吴桂成, 等. 超级稻群体籽粒库容特征的初步研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(2): 250–257
Wu W G, Zhang H C, Wu G C, et al. Preliminary study on super rice population sink characters[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(2): 250–257
[34] 石丽红, 纪雄辉, 李永华, 等. 施氮量和时期运筹对超级杂交稻植株氮含量与籽粒产量的影响研究[J]. 土壤, 2011, 43(4): 534–541
Shi L H, Ji X H, Li Y H, et al. Effect of nitrogen application amount and stage management on nitrogen content in plant and grain yield of super hybrid rice[J]. Soils, 2011, 43(4): 534–541
[35] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 等. 实地氮肥管理对寒地水稻干物质积累和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(11): 2286–2293
Peng X L, Liu Y Y, Luo S G, et al. Effects of the site-specific nitrogen management on yield and dry matter accumulation of rice in cold areas of Northeastern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(11): 2286–2293
[36] 彭显龙, 刘元英, 罗盛国, 等. 寒地稻田施氮状况与氮素调控对水稻投入和产出的影响[J]. 东北农业大学学报, 2007, 38(4): 467–472
Peng X L, Liu Y Y, Luo S G, et al. Nitrogen application situation and effects of nitrogen management on cost and output of paddy field in cold area of northeast China[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2007, 38(4): 467–472
[37] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 等. 不同施肥水平下超级杂交稻对氮、磷、钾的吸收累积[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3123–3132
Ao H J, Wang S H, Zou Y B, et al. Characteristics of nutrient uptake and utilization of super hybrid rice under different fertilizer application rates[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3123–3132
[38] Jiang L G, Dong D F, Gan X Q, et al. Photosynthetic efficiency and nitrogen distribution under different nitrogen management and relationship with physiological N-use efficiency in three rice genotypes[J]. Plant and Soil, 2005, 271(1/2): 321–328
[39] 傅庆林, 俞劲炎, 陈英旭. 氮素营养对水稻干物质和氮分配的影响及氮肥需求量[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2000, 26(4): 399–403
Fu Q L, Yu J Y, Chen Y X. Effect of nitrogen applications on dry matter and nitrogen partitioning in rice and nitrogen fertilizer requirements for rice production[J]. Journal of Zhe

jiang University: Agriculture & Life Sciences, 2000, 26(4): 399–403

[40] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490–496
Jiang L G, Cao W X, Gan X Q, et al. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(4): 490–496

[41] 薛利红, 覃夏, 李刚华, 等. 基蘖肥氮不同比例对直播早稻群体动态、氮素吸收利用及产量形成的影响[J]. 土壤, 2010, 42(5): 815–821
Xue L H, Qin X, Li G H, et al. Effect of basal and tiller nitrogen rates on population dynamics, nitrogen uptake and utilization, and yield formation of direct-seeding early rice[J]. Soils, 2010, 42(5): 815–821

[42] 林忠成, 李土明, 吴福观, 等. 基蘖肥与穗肥氮比例对双季稻产量和碳氮比的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 269–275
Lin Z C, Li T M, Wu F G, et al. Effects of nitrogen application on yield and C/N of double-cropping rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 269–275

[43] 李木英, 石庆华, 黄才立, 等. 穗肥运筹对超级杂交稻淦鑫688 源库特征和氮肥效益的影响[J]. 杂交水稻, 2010, 25(2): 63–72
Li M Y, Shi Q H, Huang C L, et al. Effects of nitrogen application of panicle fertilizer on source-sink characteristics and nitrogen fertilizer use efficiency of super hybrid rice Ganxin 688[J]. Hybrid Rice, 2010, 25(2): 63–72

[44] 刘桃菊, 唐建军, 江绍琳, 等. 氮肥后移对超级稻扬两优 6 号产量及氮肥利用率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(7): 57–60
Liu T J, Tang J J, Jiang S L, et al. Effect of postponing nitrogen fertilizer application on yield and nitrogen using efficiency of super rice Yangliangyou6[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2012, 43(7): 57–60

[45] 俞巧钢, 陈英旭. DMPP 对稻田田面水氮素转化及流失潜能的影响[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1274–1280
Yu Q G, Chen Y X. Influences of nitrification inhibitor 3, 4-dimethylpyrazole phosphate on nitrogen transformation and potential runoff loss in rice fields[J]. China Environmental Science, 2010, 30(9): 1274–1280

[46] 李香兰, 徐华, 蔡祖聪. 氢醌、双氰胺组合影响稻田甲烷和氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 917–924
Li X L, Xu H, Cai Z C. Effect of combined use of hydroquinone and dicyandiamide on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy field: a review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 917–924

[47] 孙爱文, 石元亮, 张德生, 等. 硝化/脲酶抑制剂在农业中的应用[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 357–361
Sun A W, Shi Y L, Zhang D S, et al. Application of nitrification-urease inhibitors in agriculture[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(3): 357–361

[48] 彭玉净, 田玉华, 尹斌. 添加脲酶抑制剂 NBPT 对麦秆还田稻田氨挥发的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 19–23
Peng Y J, Tian Y H, Yin B. Effects of NBPT urease inhibitor on ammonia volatilization in paddy fields with wheat straw application[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(1): 19–23

[49] 叶会财, 李大明, 柳开楼, 等. 脲酶抑制剂配施比例对红壤双季稻产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 909–912
Ye H C, Li D M, Liu K L, et al. Effects of combined application rate of urease inhibitor on rice yield in red paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 909–912

[50] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 821–830
Zhang W X, Sun G, He P, et al. Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy fields[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2014, 20(4): 821–830

[51] 王斌, 李玉娥, 万运帆, 等. 控释肥和添加剂对双季稻温室气体排放影响和减排评价[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 314–323
Wang B, Li Y E, Wan Y F, et al. Effect and assessment of controlled release fertilizer and additive treatments on greenhouse gases emission from a double rice field[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(2): 314–323

[52] 陈利军, 史奕, 李荣华, 等. 脲酶抑制剂和硝化抑制剂的协同作用对尿素氮转化和 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 1995, 6(4): 368–372
Chen L J, Shi Y, Li R H, et al. Synergistic effect of urease inhibitor and nitrification inhibitor on urea-N transformation and N_2O emission[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1995, 6(4): 368–372

[53] 张文学, 孙刚, 何萍, 等. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1411–1419
Zhang W X, Sun G, He P, et al. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(6): 1411–1419

[54] 李敏, 叶舒娅, 刘枫, 等. 稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(6): 559–564
Li M, Ye S Y, Liu F, et al. Effects of stabilized nitrogen fertilizer application amount and application methods on yield and nitrogen efficiency of rice[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2015, 32(6): 559–564